

激光与光电子学进展

单灯多显示 LED 智能铁路信号机的光学混色研究

贺清*, 杜跃飞, 赵康效

兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 针对我国现有铁路信号机存在的色衰以及色品坐标偏移的问题, 提出了一种单灯多显示发光二极管(LED)混光智能信号机的设想。首先, 根据格拉斯曼定律及国际照明委员会标准色度系统混光原理建立了 RGB(Red, Green, Blue)三色混光调制系统。然后, 建立了占空比与色品坐标、相关色温的函数关系, 并采用脉冲宽度调制方式分别对 RGB 三通道中的月白色、黄色、紫色灯光进行调节。最后, 完成了占空比可调的三通道混光调制系统的设计与构建, 并结合相对光通量衰减数据进行了仿真及实验验证。结果表明, RGB 三色光系统可精确设定各色灯光的相关色品坐标, 实现不同情况下的色品调节, 满足铁路信号显示的需求。

关键词 视觉光学; 铁路信号机; 色品坐标; 混光调制; 脉冲宽度调制

中图分类号 U284.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1133002

Research on Optical Color Mixing of Single Lamp Multi Display LED Intelligent Railway Signal

He Qing*, Du Yuefei, Zhao Kangxiao

School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University,

Lanzhou 730070, Gansu, China

Abstract Aiming at the problems of color fading and chromaticity coordinate deviation in the existing railway signal in China, an idea of single lamp multi display light emitting diode (LED) mixed light intelligent signal is proposed in this paper. First, according to Grassmann's law and International Commission on illumination standard chromaticity system mixing principle, the RGB (Red, Green, Blue) three-color mixing modulation system is established. Then, the functional relationship between duty cycle, chromaticity coordinates and related color temperature is established, and the RGB three channel moon white, yellow and purple lights are adjusted by pulse width modulation. Finally, the design and construction of three channel mixed light modulation system with adjustable duty cycle are completed, and the simulation and experimental verification are carried out combined with the relative luminous flux attenuation data. The results show that the RGB three-color light system can accurately set the relevant chromaticity coordinates of each color light and realize the chromaticity adjustment under different conditions, so as to meet the needs of railway signal display.

Key words visual optics; railway signal; chromaticity coordinate; mixed light modulation; pulse width modulation

1 引言

目前,我国广泛采用的发光二极管(LED)铁路

信号机在长期使用以及温度变化较大或雾霾、沙尘暴等恶劣天气情况下存在色衰及色品坐标偏移问题。针对 LED 存在的变色问题, Kirklen 等^[1]以氦氛

收稿日期: 2021-07-23; 修回日期: 2021-08-17; 录用日期: 2021-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(51967010)、甘肃省教育厅优秀研究生“创新之星”项目(2021CXZX-601)

通信作者: *1900309985@qq.com

激光系统为参考,在可控雾室中对比了六种不同波长LED的衰减特性。在雾霾、沙尘暴等天气条件下,大气中的尘埃、硫酸、有机碳氢化合物、污染颗粒等非水成分会形成不同形态的气溶胶,且不同波长在大气中的透过率也不同,会发生不同程度的消光作用^[2-3]。李晋闽等^[4-5]对LED的发展进行了总结分析;胡奕彬等^[6-7]提出了一种动态调节LED光色品的方法,采用暖白光和冷白光两种LED进行混色实验或将可调蓝光LED与白光LED组成光源模块的方式^[8],建立了双通道脉冲宽度调制(PWM)冷暖白光LED的混色模型。对于动态日光光谱的模拟^[9-10]以及混光LED的均匀性^[11-12]等问题,人们也进行了讨论研究。Ng等^[13]在一个或多个原色发光二极管达到设定阈值电流时调节颜色设置点,避免了二极管老化后平均驱动电流饱和导致的原色失调问题。周国华等^[14-15]基于开关调制技术探讨了PWM、脉冲频率调制(PFM)等调制方法的本质区别,并介绍了各种控制方式的分类情况。Zhao等^[16]讨论了添加外部补偿电路时PWM驱动方式的性能。

上述研究对LED的混光性能、调制方案进行了深入分析,在此基础上,本文提出了一种单灯位多显示LED混光智能信号机的构想^[17]。针对铁路LED信号机黄色、月白色灯光存在的色衰及特殊天气情况下的变色问题,利用三刺激法、混光调色原理以及PWM原理对RGB(Red, Green, Blue)三色

光的比例进行调整,使铁路信号机通过单灯位完成红色、黄色、绿色、蓝色、月白色(白色)、紫色等信号的显示,并满足铁路信号系统的行业规范要求。仿真和实验结果表明,RGB三色调光系统可精确设定各色灯光相关的色品坐标,从而实现铁路LED信号机各色灯的精准显示和调整。

2 LED 铁路信号机光色品坐标的范围分析

根据TB/T 2081—2016《铁路信号灯光颜色》^[18]标准,在XYZ色品系统中,各色灯光的色品坐标 (x, y, z) 可以由三刺激值(红原色刺激量 X 、绿原色刺激量 Y 、蓝原色刺激量 Z)计算,可表示为

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}, z = \frac{Z}{X+Y+Z}, \quad (1)$$

$$x + y + z = 1. \quad (2)$$

色品图 (x, y) 中铁路信号各灯光的颜色区域如图1(a)所示,信号灯光的颜色为红色、黄色、绿色、蓝色、紫色和月白色,不允许再使用其他颜色。以月白色为例,其灯光颜色的色品坐标如图1(b)所示,灯光颜色边界交点的色品坐标如表1所示。其中, I、J、K、L等均表示颜色的坐标点。LED灯珠会因长时间使用出现色衰现象,在沙尘、大雾等特殊天气情况下出现色品坐标偏移现象,从而影响铁路运行效率及行车安全。

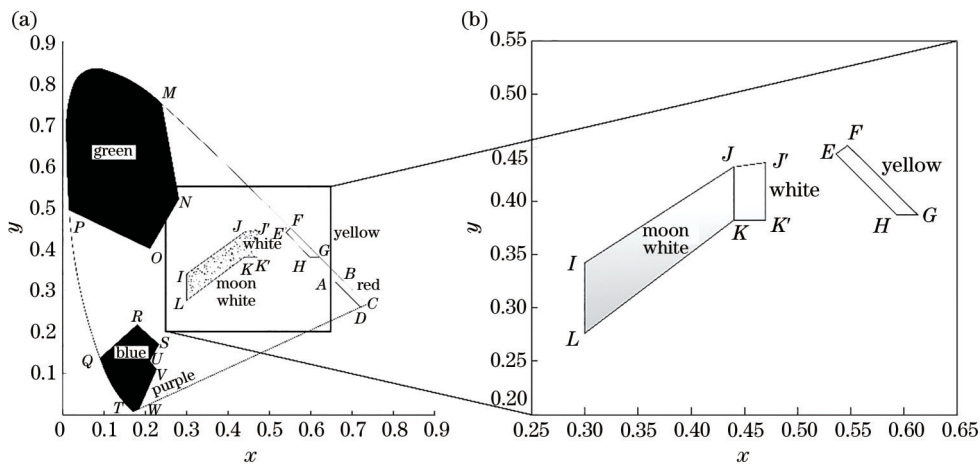


图1 铁路信号灯光颜色的区域图。(a)信号灯各色的坐标分布图;(b)月白色坐标的局部放大图

Fig. 1 Area diagram of the railway signal light color. (a) Coordinate distribution of various colors of signal lights (b) local enlarged view of moon white light coordinates

根据格拉斯曼颜色混合定律以及国际照明委员会(CIE)标准色度系统混光原理可知,两种色光叠加时产生的第三种色光会处在两种底色坐标的连线之间,具体位置由两个原色所占的比例决定,

如图2所示。其中, G、B、O、R、P表示不同的颜色的坐标点。三种色光如R、G、B叠加产生的新色光处于三种底色构成的三角形区域内,可先由R色光、B色光合成P色光(P色光处于R、B所在线段上),再由

表 1 月白色铁路信号灯光颜色边界的交点坐标

Table 1 Coordinate values of color boundary intersection of moon white railway signal lights

Coordinate	<i>I</i>	<i>J</i>	<i>J'</i>	<i>K'</i>	<i>K</i>	<i>L</i>
<i>x</i>	0.300	0.440	0.470	0.470	0.440	0.300
<i>y</i>	0.342	0.432	0.436	0.382	0.382	0.276

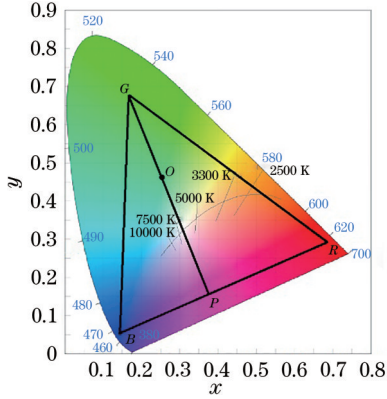


图 2 CIE 的色品分析图

Fig. 2 Chromaticity analysis diagram of the CIE

P 色光和 *G* 色光按规定比例合成 *O* 色光, 采用 RGB 三色调制色品坐标时, RGB 各色所需的比例唯一。

混色坐标的求取方式有计算法和作图法两种, 实验中采用计算法。多种色光混合时, 色品坐标不能直接相加, 需要利用三刺激值计算。当两种或两种以上已知三刺激值的色光相加混合时, 混合色的三刺激值等于各色光三刺激值之和, 可表示为

$$\begin{cases} X = X_1 + \dots + X_n \\ Y = Y_1 + \dots + Y_n \\ Z = Z_1 + \dots + Z_n \end{cases} \quad (3)$$

式中, X_i, Y_i, Z_i 为各色的三刺激值, n 为混合色的种类。已知两种色光的色品坐标 x, y 及亮度 Y , 则混光的色品坐标可由各色光的三刺激值转换得到, 可表示为

$$\begin{cases} X = \frac{x}{y} \times Y \\ Y = Y \\ Z = \frac{z}{y} \times Y = \frac{1-x-y}{y} \times Y \end{cases} \quad (4)$$

TB/T 2353—2018《铁路信号灯光发光强度》^[19]中明确了各种色光的光强范围和最低光强, 在解决色光变色问题时要保证光照强度可调。RGB 混合光的光照强度可调数学模型可表示为

$$I_R : I_G : I_B = C_R : C_G : C_B, \quad (5)$$

式中, C_R, C_G, C_B 为比例常数, I_R, I_G, I_B 为红、绿、蓝色灯光的输入等级, 取值范围为 0~255。将各色的输入等级比控制为常数, 可在不改变灯色的情况下调节光照度。

根据 TB/T 2081—2016《铁路信号灯光颜色》的规定, 通过 PWM 对 RGB 三色光进行调制, 利用 TracePro 仿真软件研究了不同占空比时铁路 LED 信号机存在的色衰和沙尘雾霾等特殊天气情况下出现的色品坐标偏移问题。

3 PWM 调光机制

采用 PWM 方式调节铁路 LED 信号机的色品前, 需确定混合光的色品坐标与占空比、相关色温与色品坐标的函数关系。

3.1 混合光色品坐标与占空比的关系

设 RGB 三色 LED 在额定电流工作下的光通量分别为 L_R, L_G, L_B , 三通道 PWM 的占空比分别为 D_R, D_G, D_B , 可表示为

$$\begin{cases} L'_R = L_R \times D_R \\ L'_G = L_G \times D_G \\ L'_B = L_B \times D_B \end{cases} \quad (6)$$

式中, L'_R, L'_G, L'_B 为 R、G、B 三色在 PWM 方式下的光通量。经过 PWM 的三色光三刺激值可用亮度及色品表示为

$$\begin{cases} X_R = \frac{x_R L_R D_R}{y_R}, & Y_R = L_R D_R, & Z_R = \frac{z_R L_R D_R}{y_R} \\ X_G = \frac{x_G L_G D_G}{y_G}, & Y_G = L_G D_G, & Z_G = \frac{z_G L_G D_G}{y_G} \\ X_B = \frac{x_B L_B D_B}{y_B}, & Y_B = L_B D_B, & Z_B = \frac{z_B L_B D_B}{y_B} \end{cases} \quad (7)$$

根据式(3)及式(7)得到混色光的三刺激值为

$$\begin{cases} X_m = X_R + X_G + X_B = \frac{x_R L_R D_R}{y_R} + \frac{x_G L_G D_G}{y_G} + \frac{x_B L_B D_B}{y_B} \\ Y_m = Y_R + Y_G + Y_B = L_R D_R + L_G D_G + L_B D_B \\ Z_m = Z_R + Z_G + Z_B = \frac{z_R L_R D_R}{y_R} + \frac{z_G L_G D_G}{y_G} + \frac{z_B L_B D_B}{y_B} \end{cases} \quad (8)$$

联立式(1)、式(2)、式(7),得到

$$\begin{cases} x_m = \frac{x_R y_G y_B L_R D_R + x_G y_R y_B L_G D_G + x_B y_G y_R L_B D_B}{y_G y_B L_R D_R + y_R y_B L_G D_G + y_G y_R L_B D_B} \\ y_m = \frac{y_R y_G y_B L_R D_R + y_G y_R y_B L_G D_G + y_B y_G y_R L_B D_B}{y_G y_B L_R D_R + y_R y_B L_G D_G + y_R y_G L_B D_B} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)为经 PWM 后 RGB 三色混光坐标和占空比之间的关系式,其中,各单色坐标 (x_i, y_i) 在 LED 灯珠确定后均为常数,占空比 D_i 为唯一自变量。确定三色光源的占空比后,可进一步确定各色光的光通量 L'_i 。联立式(8)、式(9),得到各色光的占空比为

$$\begin{cases} D_R = \frac{(y_G - y_B)(x_B - x_m) + (y_m - y_B)(x_G - x_B)}{(y_G - y_B)(x_B - x_R) + (y_R - y_B)(x_G - x_B)} \times \frac{y_R Y_m}{y_m Y_R} \\ D_G = \frac{(y_B - y_R)(x_R - x_m) + (y_m - y_R)(x_B - x_R)}{(y_B - y_R)(x_R - x_G) + (y_G - y_R)(x_B - x_R)} \times \frac{y_G Y_m}{y_m Y_G} \\ D_B = \frac{(y_R - y_G)(x_G - x_m) + (y_m - y_G)(x_R - x_G)}{(y_R - y_G)(x_G - x_B) + (y_B - y_G)(x_R - x_G)} \times \frac{y_B Y_m}{y_m Y_B} \end{cases} \quad (10)$$

3.2 色温与占空比的函数关系

用相关色温 T_c 表征 LED 的色温,利用 PWM 调光时,通过调节 RGB 各色的占空比动态调整混光的色温。相关色温是衡量光源质量的重要指标,采用典型日光轨迹取代黑体轨迹查询法^[20],则光源色品坐标的函数关系可表示为

$$y_m = -3000x_m^2 + 2.870x_m - 0.275. \quad (11)$$

当 $4000 \text{ K} \leq T_c \leq 7000 \text{ K}$ 时,相关色温 T_c 与混光色品坐标 x_m 的关系可表示为

$$x_m = -4.607 \times \frac{10^9}{T_c^3} + 2.9678 \times \frac{10^6}{T_c^2} + 0.09911 \times \frac{10^3}{T_c} + 0.244063. \quad (12)$$

当 $7000 \text{ K} \leq T_c \leq 25000 \text{ K}$ 时,相关色温 T_c 与混光色品坐标 x_m 的关系可表示为

$$x_m = -2.0064 \times \frac{10^9}{T_c^3} + 1.9018 \times \frac{10^6}{T_c^2} + 0.24748 \times \frac{10^3}{T_c} + 0.23704. \quad (13)$$

建立相关色温 T_c 和色品坐标 (x_m, y_m) 的函数关系后,对于低于 4000 K 的色温,采取黑体轨迹获取相应的色品坐标。结合式(9)~式(10)确定占空比和色品坐标的关系,从而确定相关色温 T_c 与不同色光脉冲占空比 D_i 的函数关系。根据混合光色品坐标与占空比以及相关色温与占空比的函数关系,采取 PWM 方式在式(9)的约束下调节单色光的占空比,进而实现对铁路 LED 信号机色品坐标的精确调整。

4 仿真及实验测试结果

长期现场实践表明:LED 铁路信号机中红色、绿

色、蓝色 LED 信号灯的光色较为稳定;黄色、月白色 LED 信号灯在长期使用后以及特殊天气情况下会发生色品坐标偏移现象,如黄色偏橙光、月白色偏蓝光时易造成司机及工作人员远距离辨识模糊或误判,从而影响列车的行车安全及运输效率。因此,实验主要以月白色灯光的色品漂移和调制为例进行研究。

4.1 色灯相对光通量衰竭的测试

实验采用欧司朗光电半导体公司(OSRAM Semiconductors)生产的 OSTAR[®] Stage LED 灯珠,表 2 为三色 RGB 灯珠的光度学参数,选取的正向电流为 1400 mA ,工作温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

表 2 RGB 灯珠的光度学参数
Table. 2 Photometric parameters of RGB lamp beads

LED	x	y	Luminous flux /lm	Main wavelength /nm	Voltage / V
Red	0.701	0.298	196	625	2.35
Green	0.155	0.806	420	530	3.48
Blue	0.153	0.021	100	453	3.00

针对混色色光色衰后色品漂移导致的变色问题,需要对 RGB 三色灯珠色光色衰后的色品坐标及相关色温偏移情况进行实验测试。造成 LED 光衰减的主要原因是温度,LED 寿命随着工作温度的升高而缩短。针对现有 LED 散热方式效率不足的问题, Park 等^[21]通过数值计算研究了散热器和绝缘材料对 LED 散热参数的影响; Huang 等^[22]探究了氮化铝(AlN)衬底在大功率 LED 中的散热性能; 李小华等^[23-24]采用不同的方式进行了 LED 的散热研究。因此,实验只研究了温度对灯珠光通量的影响,结果如图 3 所示。

测试结果表明:RGB 各色灯珠的相对光通量均

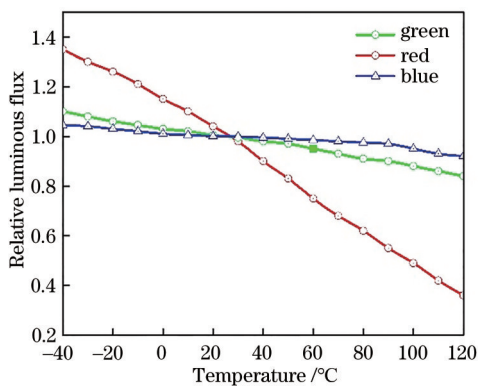


图 3 温度对 LED 光通量的影响

Fig. 3 Influence of temperature on LED luminous flux

随温度的提升呈现不同程度的下降;红色 LED 灯珠的光衰幅度最明显,工作温度达到 100 °C 时的相对光通量仅为正常工作状态(25 °C)的 0.5 倍,会耗费更多能量发热做功;绿色、蓝色 LED 灯珠相对光通量的下降幅度比较平缓,在最大阈值温度(120 °C)时可达正常工作状态的 0.8 倍。这表明采用 RGB 三通道 PWM 调光系统时需根据铁路信号机内部的实际工作温度进行调整。

4.2 PWM 调光实验及 TracePro 仿真

PWM 调光模拟系统的硬件如图 4 所示。系统分为调光板和遥控电路两个部分。调光板主要由 STC8F2K16S2-44 单片机、LC12S 无线通信模块、OSTAR® Stage LED 灯珠组成。考虑到灯珠长时间点亮发热会导致亮度变暗的情况,采用 AMC7135 芯片恒流驱动各色 LED 灯珠。遥控电路主要由 STC8F2K08S2 单片机、LC12S 无线通信模块及 OLED 显示模块组成。两部分采用无线通信

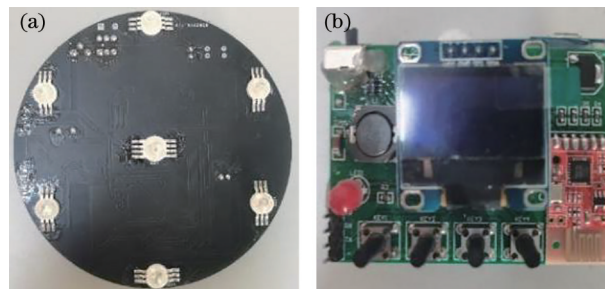


图 4 PWM 调光模拟系统的硬件。(a)调光板;(b)遥控电路
Fig. 4 Hardware of PWM dimming simulation system.

(a) Dimming plate; (b) remote control circuit

方式交互信息,调光板接收动作信息后灯珠点亮,显示模块显示 RGB 的占空比信息。

根据 TB/T 2081—2016《铁路信号灯光颜色》的规定,首先设定铁路信号机月白色灯光在 25 °C 时的期望坐标为(0.329, 0.349),期望光通量为 200 lm,在相关色温为 5893 K 的环境下进行实验。图 5 为通过 TracePro 光学仿真软件绘制的期望色品坐标图。根据式(10)计算的三通道占空比 D_R 、 D_G 、 D_B 分别为 0.269、0.335、0.045。图 6 为铁路信号机 RGB 合成月白色灯光色品坐标随工作温度变化时的偏移情况。表 3 为色度参数随温度变化的偏移情况,并给出了不同温度时各色度坐标与期望值(0.329, 0.349)的色差及超标情况,色差使用美国国家标准局(NBS)单位。从图 6 及表 3 的坐标和色温偏移情况可以发现:所选灯珠在 -40~40 °C 温度下均可保持在月白色坐标标准范围内,在 50~80 °C 温度下坐标向蓝色方向偏移,这与铁路信号机的现场工作情况相吻合。由于色品偏移情况与初始坐标设定(工

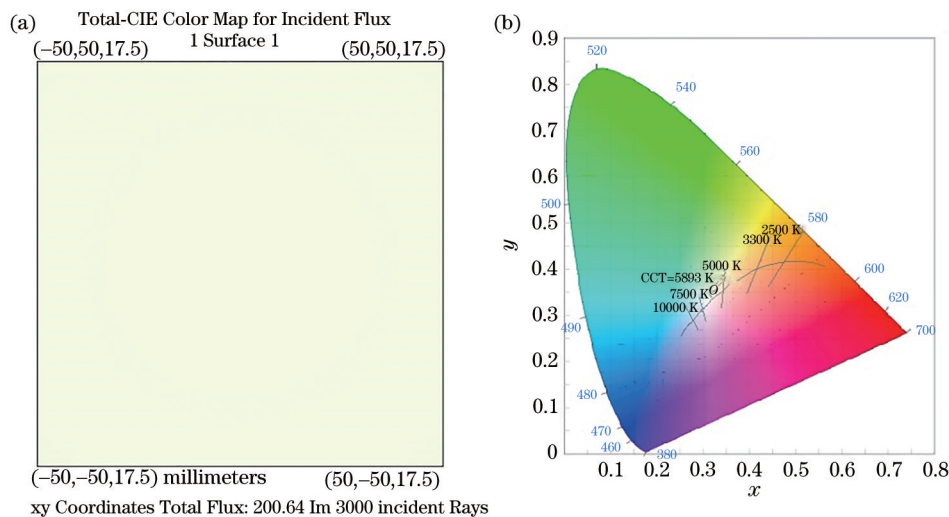


图 5 月白色的期望坐标图。(a)月白色;(b)月白色坐标在色度图中的位置

Fig. 5 Desired coordinate plot of moon white light. (a) Moon white light; (b) location of moon white light coordinates

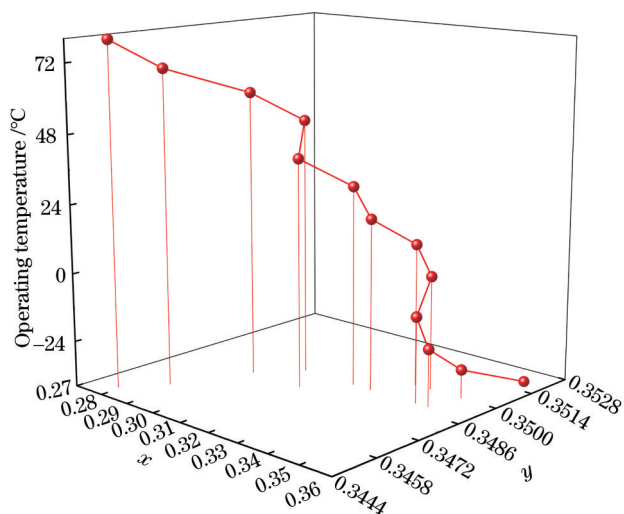


图 6 月白色灯光色品坐标随工作温度变化的偏移情况
Fig. 6 Shift of moon white light chromaticity coordinates with operating temperature

作状态为 25 °C)及所选的灯珠有关,在初始色品坐标为(0.375,0.350)时也进行了相关仿真实验。结果表明,在工作温度处于-40~80 °C时,色品坐标始终满足 TB/T 2081—2016《铁路信号灯光颜色》对月白色灯光的规定。

在模拟月白色铁路信号机色品坐标实验中,采用图 4 中的调光实验模拟平台,根据表 3 中的色品坐标数据,通过调节三路 PWM 的占空比改变 RGB 三色 LED 灯珠的光通量。图 7 为部分色品坐标的模拟效果,其中,序号为 1、6、7、8 的色品坐标偏移量超过 TB/T 2081—2016《铁路信号灯光颜色》规定的月白色坐标范围。实际使用 PWM 调光 LED 铁路信号机系统时,可随时根据 LED 灯珠的光通量衰减特性以及天气状况调制 RGB 各色 LED 灯珠的占空比,以保证 LED 信号机在不同工作情况均满足色品稳定的需求。

表 3 色度参数随温度偏移的情况

Table 3 Shift of chromaticity parameters with temperature

Temperature / °C	D_R	D_G	D_B	x	y	Relative color temperature /K	Chromatic aberration /NBS	Whether it exceeds the standard or not?
-40	0.316	0.320	0.041	0.353	0.352	4748	17.18	yes
-30	0.312	0.322	0.042	0.349	0.350	4870	15.15	yes
-20	0.309	0.323	0.043	0.347	0.350	4948	13.69	yes
-10	0.303	0.325	0.043	0.343	0.349	5088	11.10	yes
0	0.296	0.329	0.044	0.339	0.350	5280	7.22	yes
10	0.288	0.332	0.044	0.334	0.350	5465	3.12	yes
20	0.280	0.336	0.045	0.328	0.349	5704	0.69	yes
30	0.270	0.340	0.046	0.322	0.349	5984	4.47	yes
40	0.256	0.346	0.048	0.313	0.348	6385	8.58	yes
50	0.243	0.352	0.049	0.305	0.349	6772	12.08	no
60	0.228	0.359	0.051	0.296	0.348	7254	14.40	no
70	0.215	0.364	0.052	0.287	0.346	7767	16.00	no
80	0.203	0.370	0.054	0.279	0.345	8255	17.41	no

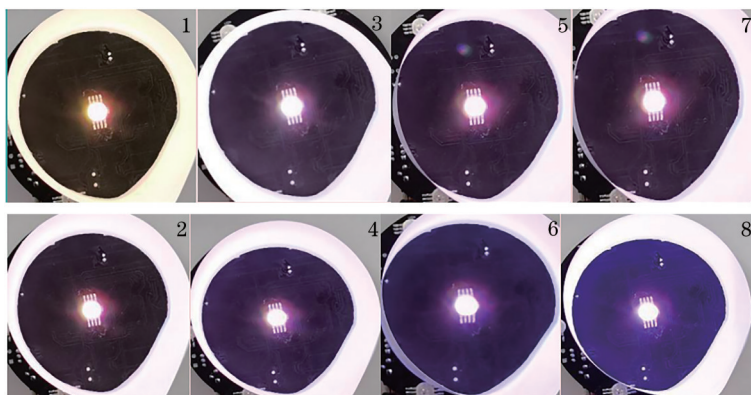


图 7 部分色品坐标的模拟效果图

Fig. 7 Simulated effect diagram of partial chromaticity coordinates

5 结 论

针对 LED 铁路信号机存在的色衰及特殊天气情况下的色品坐标偏移问题,提出了一种采用 PWM 方式建立的 RGB 三色混光调制系统。首先,对 RGB 三通道进行月白色灯光的调节,完成了占空比可调的三通道混光调制系统的设计与构建。然后,根据格拉斯曼颜色混合定律及 CIE 标准色度系统混光原理,建立占空比与信号机灯光色品坐标、相关色温之间对应的函数关系,利用 TracePro 光学仿真软件对选定的 LED 信号机色灯进行仿真实验。最后,通过 LED 灯珠光衰后相对光通量的变化情况计算月白色灯光色品坐标及色温偏移,提出了月白色信号灯光的色品调制方案。搭建实验模拟平台,利用混光实验对各色灯光进行检测评估。结果表明,PWM 混光调制模式符合 LED 铁路信号机的色光要求,具有较高的理论和实用价值,论证了用 PWM 方式控制 LED 铁路信号机的可行性,但对于雾霾、雨雪等不同天气状况下的具体调节方式还需进一步的实验论证。

参 考 文 献

- [1] Kirklen B, Arambula J, Chu C, et al. Fog attenuation analysis of visible band for free space optical link[C]//2016 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series (SUM), July 11-13, 2016, Newport Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016: 156-157.
- [2] Zaini M F B, Kurniawan B A, Nakashima Y, et al. Perceived brightness and saturation of color LED light in dense fog at night time[J]. Journal of Light & Visual Environment, 2009, 33(2): 107-109.
- [3] 叶坤涛, 吉俄木沙, 翟盛杰. 粒子形态对浑浊介质后向散射光偏振特性的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0105004.
Ye K T, Ji E M S, Zhai S J. Influence of particle shape on polarization characteristics of backscattering light in turbid media[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0105004.
- [4] 李晋闽, 刘志强, 魏同波, 等. 中国半导体照明发展综述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0116002.
Li J M, Liu Z Q, Wei T B, et al. Development summary of semiconductor lighting in China[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0116002.
- [5] 宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114001.
Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114001.
- [6] 胡奕彬, 刘士伟, 刘思远, 等. 双通道 PWM 的冷暖白光 LED 混色模型研究[J]. 光电子·激光, 2015, 26(11): 2089-2095.
Hu Y B, Liu S W, Liu S Y, et al. A study on colour mixture model for cold and warm white LEDs based on two-channel PWM[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2015, 26(11): 2089-2095.
- [7] 周锦荣. 功率型白光 LED 的非线性混合调光方法[J]. 发光学报, 2017, 38(9): 1249-1255.
Zhou J R. Nonlinear mixed-dimming method for power white LED[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(9): 1249-1255.
- [8] 魏其锋. 白光 LED 的色温稳定控制系统研究[D]. 广州: 暨南大学, 2014.
Wei Q F. Research on the color temperature control system of white light LED[D]. Guangzhou: Jinan University, 2014.
- [9] Nie J X, Chen Z Z, Jiao F, et al. Tunable LED lighting with five channels of RGCWW for high circadian and visual performances[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 8201512.
- [10] Bohar J, Fernandes G E, Xu J. Spectral-temporal LED lighting modules for reproducing daily and seasonal solar circadian rhythmicities[C]//2017 IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP), May 29-31, 2017, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2017: 16964473.
- [11] Whang A J W, Li P C, Chen Y Y, et al. Guiding light from LED array via tapered light pipe for illumination systems design[J]. Journal of Display Technology, 2009, 5(3): 104-108.
- [12] Mei L Y, Qu C, Xu Z Y, et al. Facile fabrication of microlens array on encapsulation layer for enhancing angular color uniformity of color-mixed light-emitting diodes[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 142: 107227.
- [13] Ng S K, Loo K H, Lai Y M, et al. Color control system for RGB LED with application to light sources suffering from prolonged aging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(4): 1788-1798.
- [14] 周国华, 赵泓博, 毛桂华, 等. 开关变换器调制技术的分类与综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 1133002-7.

- 6383-6400, 6501.
- Zhou G H, Zhao H B, Mao G H, et al. Overview and classification of modulation techniques of switching converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6383-6400, 6501.
- [15] 程启明, 程尹曼, 薛阳, 等. 三相电压源型 PWM 整流器控制方法的发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 145-155.
- Cheng Q M, Cheng Y M, Xue Y, et al. A summary of current control methods for three-phase voltage-source PWM rectifiers[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 145-155.
- [16] Zhao B, Xiao J C, Liu Q S, et al. A novel compensation pixel circuit for high bits of AM mini/micro-LED based on PWM method[J]. Energy Reports, 2021, 7: 343-348.
- [17] 贺清, 蓝天, 曲艺兵, 等. 一种三显示单灯式智能铁路色灯信号机: CN209821639U[P]. 2019-12-20.
- He Q, Lan T, Qu Y B, et al. A three display single lamp intelligent railway color light annunciator: CN209821639U[P]. 2019-12-20.
- [18] 国家铁路局. 中华人民共和国铁路运输行业标准: 铁路信号灯光颜色 TB/T 2081—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- Railway & Train Standard of the People's Republic of China: colours of railway signal light. TB/T 2081—2016 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.
- [19] 国家铁路局. 中华人民共和国铁路运输行业标准: 铁路信号灯光发光强度 TB/T 2353—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- Railway & Train Standard of the People's Republic of China: luminous intensity of railway signals light. TB/T 2353—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.
- [20] 张浩, 徐海松. 光源相关色温算法的比较研究[J]. 光学仪器, 2006, 28(1): 54-58.
- Zhang H, Xu H S. Comparative study of correlated color temperature algorithm for lighting sources[J]. Optical Instruments, 2006, 28(1): 54-58.
- [21] Park D H, Lee D B, Seo E R, et al. A parametric study on heat dissipation from a LED-lamp[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108: 1261-1267.
- [22] Huang D, Liu Z, Harris J, et al. High thermal conductive AlN substrate for heat dissipation in high-power LEDs[J]. Ceramics International, 2019, 45(1): 1412-1415.
- [23] 李小华, 包伟伟, 王静, 等. 基于电流体动力学的 LED 前照灯散热[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(7): 1284-1289.
- Li X H, Bao W W, Wang J, et al. Heat dissipation of LED headlamps based on corona discharge[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(7): 1284-1289.
- [24] 王静, 蔡忆昔, 包伟伟, 等. 离子风强化大功率 LED 散热的实验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(10): 1952-1958.
- Wang J, Cai Y X, Bao W W, et al. Experimental study of high power LEDs enhanced cooling performance by ionic wind[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(10): 1952-1958.